

## 貞観地震による津波災害の定量的評価

著者	箕浦 幸治
URL	<a href="http://hdl.handle.net/10097/39708">http://hdl.handle.net/10097/39708</a>



# 貞観地震による津波災害の定量的評価

## Quantitative Analysis of Tsunami Disasters by The Jogan Earthquake

平成 17, 18, 19 年度  
科学研究費補助金 (基盤研究 (B) (1))  
研究成果報告書  
課題番号 17310103

RESEARCH PROJECT, GRANT-IN -AID  
FOR SCIENTIFIC RESEARCH (B) (1)  
No. 17310103 (2005-2007)

研究代表者 箕浦幸治  
(東北大学大学院理学研究科地学専攻)  
Chief Scientist: Prof. Minoura, Koji  
(Institute of Geology and Paleontology,  
Graduate School of Science, Tohoku University)

## 図版の解説

図版Ⅰ：2004 年インド大津波による礁外縁岩隕の移動と堆積。タイ・パカラン岬における津波石の分布を記録した空中写真。

図版Ⅱ：2004 年インド洋大津波によって礁平原に打ち上げられた珊瑚岩隕。岩隕の周辺には同時に移送された礁起源碎屑物が堆積している。

図版Ⅲ：明和 8 年八重山地震に伴う津波により石垣島宮良湾の礁平原に打ち上げられた石灰岩塊。西暦 1771 年 4 月 24 日に発生した八重山津波は宮古諸島や八重山諸島に襲来し（牧野, 1968）、未曾有の大災害が発生したとされている（球陽研究会, 1974）。この津波による犠牲者は、古文書の『球陽』によると、宮古諸島で 2,548 人、八重山諸島で 9,393 人に達した。

図版Ⅳ：ジオスライサーによる津波堆積物の掘削。仙台平野では、地表面下 50cm ～ 1 m の層準に 869 年貞観地震津波堆積物が発達している。本研究では、簡易掘削機（ジオスライサー）によりその分布と堆積様式の復元を試みた。

図版Ⅴ：ジオスライサーによる地層断面に認められる広域テフラ（褐色層）とその直下の貞観津波堆積物（明灰色砂）。























# 目次

はじめに.....	2
研究プロジェクトの内容と成果 .....	5
第1章 概説:津波の災害科学.....	9
1. 研究の目的と意義.....	9
2. 津波堆積物の分析 .....	10
3. 津波の数値解析 .....	11
第2章 869 年貞観地震による津波災害の歴史的 考察 .....	13
第3章:津波堆積物により明らかにされた貞観津波の 実態 .....	17
第4章 付録:本研究による成果報告 .....	30
1. 津波の堆積学.....	31
2. 津波石の起源に関する堆積学的研究.....	87
3. 海底地滑りによる津波の発生 トルコ・北アナトリア断層における地質学的痕跡 .....	106
4. 引き波に伴う海底堆積物の移動 -2004 年インド洋大津波に関する古生物学 的検討 .....	119
おわりに .....	135



## はじめに

災害は定常的自然過程の破局により発生し、大規模海面変動による効果はその典型である。津波の場合には、押し波と引き波が **total** として災害の発生をもたらすわけであるが、堆積学的に未だに漠とした認識に留まっている。この現状を打破すべく、これまでの貞観地震による津波の堆積物研究で得た成果を再調査し、本研究の開始時である平成17年4月より貞観津波の災害科学的実態の解明に努めてきた。得られた成果を総括し、2007年6月に開催された IUGG で発表した。そこで提示した津波堆積モデルを図1に示す。

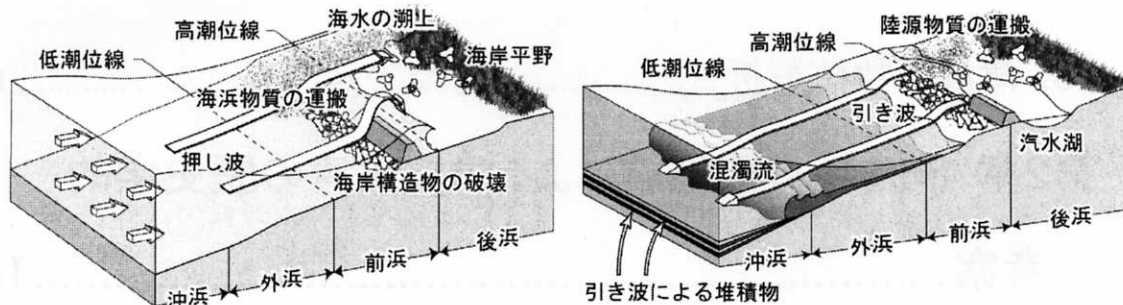


図1 津波の押し波(左)および引き波(右)による流れの発生と物質運搬

実態解明の試みを通して、災害津波の環境波及効果を理解するには、水理学と堆積学の考察に基づく押し波と引き波の総合的評価が不可欠であるとの認識に到達した。この考えを検証する目的で、2004年インド洋大津波が襲来したタイのプーケット付近の陸と海とで採取した堆積物の詳細な解析を行ったところ、海水の戻りによる密度流が予想を超えて大規模である可能性を見いだした。津波災害が懸念されている現状、この予察的可能性は、これまで全く考慮されなかった引き波による未確認の災害の発生を示唆している。重力効果による海水流の堆積学的解明は、津波災害に直面した地域の産業・都市計画に不可欠の知見となるものと考え、本研究の1課題とした。

湖口や海岸平野での調査結果から、津波が海跡湖沼の成り立ちに直接関わってきた事実が明らかにされ、今日に伝承される津波襲来伝説の多くは真実である可能性が示唆された。北部三陸での海浜湖沼堆積物に関する地球化学的解析により江戸中期以降に三陸沿岸に襲来した津波の殆どが底質堆積層中に記録されている事実を見いだした(Minoura et al., 1993)。更に、下北半島の太平洋岸沿いに広く分布するヒバの枯死林が2200年程前と800年程前の未知の巨大津波によって出現した可



能性を明示した (Minoura et al., 1994)。こうした津波堆積物に関する研究成果は海外の研究者の注目するところとなり、共同研究の提案が寄せられるようになった。一例として、ロシア科学アカデミーの要請に言及する。

千島列島からカムチャッカ半島更にはアリューシャン列島にかけては、歴史的に巨大津波がしばしば襲来している。こうした津波の実態を解明すべく、要請に応じて国際調査団を結成し、1993 年から 1996 年にかけてロシア・米国・ノルウェー等の研究者と共同研究を展開していった (Bondevik et al., 1994)。カムチャッカ半島での共同調査により、積雪域での冬季の津波潮上が植生の破壊や地下水汚染 (塩害) をもたらした事実を示した (Minoura et al., 1996)。こうした成果は海外の考古学の分野でも注目され、災害発生と文明消長の関わりについてエーゲ海周辺域を対象として調査・発掘を行うこととなり、火山爆発に伴う津波の痕跡を発見するに到った。加速器を利用した最新の分析手段により、この津波痕跡が BC17 世紀中期のティラ島火山噴火事件によると結論した (Minoura et al., 2000)。津波痕跡の発見と年代特定により、ヨーロッパでの定説に修正を加え、津波災害に関わった文明の崩壊は 300 年ほど遡ることとなった。この結論は社会的に注目されることとなり、2001 年 6 月にアテネにおいて日本大使主催による市民普及講演会を行った。この成果はヨーロッパで認知され、EU 委員会主催 2003 年デカルト賞入賞研究として、2003 年 11 月ローマ科学アカデミーにて表彰された。

以後も世界の各地で津波堆積物検出の努力と古津波の発生を明らかにする一方、歴史的背景としての津波災害の意義を見いだす努力を重ね、マルマラ海沿岸では横ずれ断層運動に伴う地すべり津波が過去数 1000 年を通して小アジアの歴史形成に大きく関わってきた事実を見いだした (Minoura et al., 2005, *Natural Hazards*, vol. 36, Number 3, p. 297-306; Sugawara, et al., 2005, *Jour. Earthquake Technol.*, vol. 42, p. 147-158)。海岸侵蝕と津波の発生が現在も継続しており、これが沿岸域の開発に最大の障害になるとする警鐘を鳴らした。この成果は当地で大きな反響を呼び、2005 年 12 月末に開催されたトルコ地質学会に招待されて基調講演を行った。

本研究では、海岸域に劇的な環境改変の効果をもたらす津波に関して、物質運搬の現象を精密且つ高精度に理解すべく、特に貞観地震に伴う津波に注目して堆積学的・水理工学的な解析を試みた。これまでの内外の津波痕跡研究では、堆積層の発見と年代推定に注目されてきた。しかし、津波による物質の移動機構に関しては多くが不明であり、既述のように、巨大岩塊の移送や地形を埋積する膨大な土砂の集積に対して具体的な解釈は与えられていない。申請者は、物質の侵蝕・運搬・集積の各機構に注目し、移動する物質をミクロ的 (粒度分析, 削打痕測定, 微化石分析) 及びマクロ的 (堆積相解析, 数値解析) に検討し、津波による物質運搬メカニズムの学際的な究明を試みた。この試みに於いて、1983 年に発生した日本海中部地震津波による



海浜堆積物の移送現象の観測は、非常に教訓的な事例となった (Minoura and Nakaya, 1991, Jour. Geol., v. 99, p. 265-287)。本研究では、貞観 11 年 (869 年) 地震津波により砂の堆積現象が広範囲に現れた仙台平野と、安政元年 (1854 年) 東海地震津波が襲来し巨大な丘陵状の集積土砂堆を形成した南伊豆の入間を、マクロ的研究の対象フィールドとした。2004 年インド大津波は、観測の行き届いた最適事例として、最も重要視した。野外でのトレンチ掘削による地質調査を両地域で広範に行い、壁面観察から堆積相情報を、また採集した堆積物試料より設備備品であるレーザー一回折式粒度分析装置を用いてミクロ的データを、目的に応じて抽出した。具体的には、堆積物運搬の様式を粒度組成及び堆積相から類推し、堆積物に含まれる化石 (軟体動物, 珪藻, 有孔虫) から堆積物の起源水深を特定し、海水の溯上過程と物質運搬の実体を主として水理堆積学的に考察した。一方、様々な歴史・観測資料を基に津波発生の水力学的条件を特定し、これらを初期条件とし、復元した詳細な地形データを利用して津波の数値的復元を試みた。これによって得た水理学的結果と堆積作用の理解から、我が国において特に顕著な災害を及ぼした貞観地震津波による破局的な流れの堆積学的作用が明らかにされた。この結果は、予測される津波溯上域での物質移動の水理学的予測を可能ならしめるに留まらず、海岸平野に於ける物質集積の過程を理論的に理解する自然地理学的基準を与えるものとする。



# 研究プロジェクトの内容と成果

## I 研究組織

研究代表者: 箕浦幸治(東北大学大学院理学研究科)

研究分担者: 今泉俊文(東北大学大学院理学研究科)

研究分担者: 今村文彦(東北大学大学院工学研究科災害制御研究センター)

## II 研究経費

平成17年度	11,200 千円
平成18年度	2,200 千円
平成19年度	2,200 千円
計	13,950 千円

## III 研究発表

### (1) 研究論文

・Minoura, K., Imamura, F., Kuran, U., Nakamura, T., Papadopoulos, G.A., Takahashi, T., and Yalciner, A.C., 2005, A tsunami generated by a possible submarine slide: Evidence for slope failure triggered by the North Anatolian fault movement. Natural Hazards, Vol. 36, No. 3, p. 297-306.

・Sugawara, D., Minoura, K., Imamura, F., Takahashi, T. and Shuto, N., 2005. A Huge Sand Dome Formed by the 1854 Earthquake Tsunami in Suruga Bay, Central Japan. ISET Journal of Earthquake Technology, Vol. 42, No. 4, p. 147-158.

・越村俊一・高島正典・鈴木進吾・林春男・今村文彦・河田恵昭, 2005, インド洋における巨大地震津波災害ポテンシャルの評価, 海岸工学論文集, 第 52 巻, p. 1416-1420.

・富田孝史・有川太郎・安田誠宏・今村文彦・河田恵昭, 2005, インド洋大津波のスリランカ南西部における津波実態・被害調査報告, 海岸工学論文集, 第 52 巻, p. 1406-1410.



- ・Imamura,F., T.Arikawa,T.Tomita,T.Yasuda and Y.Kawata, 2005, Field investigation on the 2004 Indian ocean tsunami in the southwestern coast of Sri Lanka, Prof. of special Asian tsunamis session at APAC(Asian and Pacific Coasts 2005), p. 93-106.
- ・ Kawamata,K.,T.Takaoka, K.Ban,F.Imamura, S.Yamaki and E.Kobayashi, 2005, Model of tsunami generation by collapse of volcanic eruption: the 1741 Oshima-Oshima tsunami, Tsunami - Case studies and recent developments, Springer, p. 79-96.
- ・ Tanioka,Y., Y.Nishimura, K.Hirakawa, F.Imamura, I.Abe, Y.Abe, K.Shindou, H.Matsutomi, T.Takahashi, K.Imai, K.Fujima, H.Harada, Y.Namegawa, Y.Hasegawa, Y.Hayashi,A.Yoshikawa, T.Siga, A.Kamikawa, M.Kobayashi, S.Masaka, T.Kamataki, F.Nanayama, K.Satake, Y.Kawata, Y.Fukusawa, S.Kshimura, Y.Hara, Y.Azumai and K.Hirata, 2005, Field survey of the 2003 Tokachi-oki earthquake tsunami and simulation at the Ootsu Harbor located at the Pacific coast of Hokkaido, Japan, Tsunami - Case studies and recent developments, Springer, p. 135-170.
- ・Harada,K. and F.Imamura, 2005, Effects of coastal forest on tsunami hazard mitigation, Tsunami - Case studies and recent developments, Springer, p. 279-292.
- ・原口強・鳥居和樹・藤原治・島崎邦彦・今泉俊文, 2006, 東北地方三陸海岸, 大槌湾の津波堆積物, 月刊地球, Vol. 28, No. 8, p. 539-545.
- ・大家隆行・越村俊一・柳澤英明・今村文彦, 2006, 2004 年インド洋津波によるバンダアチェ市街地の津波氾濫解析と被害推定, 海岸工学論文集, 第 53 巻, p. 221-225.
- ・柳澤英明・越村俊一・後藤和久・今村文彦・宮城豊彦・林一成, 2006, マングローブ林内を遡上した津波の挙動と樹木の破壊条件□ 2004 年インド洋津波によるタイKhao Lak での被害調査, 海岸工学論文集, 第 53 巻, p. 226-230.
- ・Tomita,T., F.Imamura, T.Arakawa, T.Yasuda and Y.Kawata, 2006, Damage caused by the 2004 Indian Ocean Tsunami on the southwestern coast of Sri Lanka, Coastal Engineering Journal, Vol. 48, No. 2, p. 99-116.
- ・Maeno,F, F.Imamura and H.Taniguchi, 2006, Numerical simulation of tsunamis generated by caldera collapse during the 7.3 Kikai eruption, Kyushu, Japan, Earth Planet Space, Vol. 58, p. 1013-1024.
- ・Anata,R., H.Yanagisawa, P.Foytong, L.Panitan, S.Koshimura, and F.Imamura, 2006, Investigation of tsunami-induced damage and fragility



of buildings in Thailand after the December 2004 Indian ocean tsunami, Earthquake Spectra, Vol. 22, No. S3, p. S377-S401.

• Imamura, F., S.Koshimura, K.Goto, H.Yanagisawa and Y.Iwabuchi, Global disaster, 2006, The 2004 Indian ocean tsunami, Journal of Disaster Research, Vol. 1.No. 1, p. 131-135.

• Mazda, Y., F.Parish, F.Danielsen, and F.Imamura, 2007, Hydraulic function of mangroves in relation to tsunamis, Mangrove Science, Vol. 4, No. 5, p. 57-67.

• Goto, K., Chavanich, S., Imamura, F., Kunthasap, P., Matsui, T., Minoura, K., Sugawara, D., and Yanagisawa, H., 2007, Distribution, origin and transport process of boulders deposited by the 2004 Indian Ocean tsunami at Pakarang Cape, Thailand. Sedimentary Geology, Vol. 202, p. 821-837.

• Sugawara, D., Minoura, K., and Imamura, F., 2008, Tsunamis and tsunami sedimentology. in Shiki et al. (eds.) Tsunamiites - Features and Implication, Elsevier.

## (2) 国際会議口頭発表

• Minoura, K.: Can sedimentologists contribute anything to the escape from the fatality of tsunami hazards? International Sedimentological Congress 2006, Fukuoka, Japan, August 28 - September 1, 2006. (招待, 特別)

• Minoura, K.: Slope failure and coastal erosion around the Marmara Sea. In CGET (Chamber of Geological Engineering of Turkey). Istanbul, Turkey, December 16-18, 2005. (招待, 特別)

• Minoura, K. Sedimentation caused by a tsunami of non-earthquake source. In NSF (National Science Foundation) – sponsored workshop on tsunami deposits and their role in tsunami hazard assessment and preparedness. Seattle, USA, June 12-15, 2005. (招待, 特別)

• Minoura, K. : Micropaleontological analysis of 2004 Indian Ocean Tsunami sediments recovered from the offshore of Pakarang, Thailand. In IUGG 2007, Perugia, Italy, July 7-13, 2007.

## (3) 出版物

• Shiki, T., Tsuji, Y., Yamazaki, T., and Minoura, K., (2008) Tsunamiites -

Features and Implication. Elsevier Science, Amsterdam.

(4) 受賞・入賞など

なし



# 第1章

## 概説：津波の災害科学

### 1. 研究の目的と意義

地球上で形成・維持される環境の1つである海岸域は、絶えず劇的な改変が及ぶ場である一方、顕生代を通して最も豊に生物が生息する進化・多様性創出の場でもあった。人類も文明を発展させるに従い豊かな海岸域に活動圏を求め、現代では主要な生存と生産の場を臨海に得ている。こうした環境域には海からの破局的な環境変動現象が波及し、歴史的に人類とその成果である文明に繰り返し災害の試練を与えてきた。現象としては突発的な海面変動や海水の溯上であり、津波は最も過激な環境変動因子である。規模が最大級に達すると津波の環境変動効果は絶大となり、人類の生活圏に甚大な被害を及ぼすばかりでなく、海岸の地形を変え植生生態系に著しい改変をもたらす(例えば, Minoura et al., 1996, Sed. Geol., vol. 106, p. 145-154)。

本研究では、海岸域に劇的な堆積作用の効果をもたらす津波に関して、物質運搬と環境改変の現象をより精密且つ高精度に理解すべく、理学と工学の立場から検討する試みを企てた。これまでの内外の津波痕跡研究では、堆積層の発見と年代推定に注目されてきた。しかし、津波による物質の移動機構に関しては多くが不明であり、津波の襲来によると報告されている巨大岩塊の運搬や、平野を埋め立て有る場合には丘陵をなす膨大な海成土砂の集積に関しても、科学としての解釈は得られていない。斯くして、津波がもたらす地形・地質学的な意義はこれまで殆ど考慮されたことが無いと言っても良く、その歴史的・災害科学的評価は不十分であり、研究への地球科学的手法の適用は困難とされてきた。本研究では、この隘路を克服するため地質記録の解読と実験水槽・計算機による再現試行という攻めの方法を学際的立場で適用することにより、破局的な海面変動を引き起こす津波の実態に迫ろうとしている。地層中に津波の痕跡を層位的に見い出す試みは独創的であり、その測地的特性と堆積物の起源並びに運搬様式から津波溯上を計算機で再現することにより、極めて具体的に物質移動の様式が理解される。この結果は現実の津波に回帰され、地質学的に見極めることのできない突発的な流体现象がもたらす環境改変の様子が明らかにされると期待している。

本研究では、沈み込み帯に特有の地震発生現象に注目して、野外でトレンチ掘削を含めた堆積物調査を行い、想像の域を出ない津波による堆積現象の解明を試み

た。野外調査結果に基づき海岸を埋め立てた堆積物の起源と運搬様式を明らかにし、併せて堆積学的知識と測地情報を基に数値計算を試みた。これらの学際的研究成果は、津波による破局的運搬堆積作用を明らかにすると共に、今後予測される津波溯上域の具体的被害評価を可能ならしめ、現海岸とその後背平野の成立過程を理論的に理解する基準を与えた。トレンチ掘削により海岸平野の堆積層中にはしばしば楔状の陸側薄層化砂層の産出が確認され、地質学的時間規模で平野の形成に津波溯上が関与した可能性が示唆された。破局的な物質の運搬と堆積の機能に関しては多くが未知であり、本研究では、水槽実験装置を活用して、実験堆積学的・水理学的見地から、津波による堆積作用を考察した。急速な流れの発生により、運搬石英粒子の表面には特有の微小傷(削打痕;図版Ⅲ参照)が生じる。傷の形状は流速と運搬距離を反映すると推定されており、水槽実験によりこの推定を検証した。

## 2. 津波堆積物の分析

堆積物中に見いだされる津波堆積物は、沖浜から前浜に起源する陶太に優れた細一中粒砂から成り、陸側に薄化する堆積学的特徴を供えている。単層内で分級は一般に認められず、下底面を侵蝕する構造がみられる。泥底の閉塞水系に津波が流入する場合、浮遊物質の急激な沈積により底泥上面にしばしば荷重痕が形成される。山陰日本海沿岸各地に永く伝承され襲来の真偽が歴史学者により激しく議論されてきた万寿年間の津波について、その事実を確認すべく、箕浦は中田と共同して大規模なトレンチ掘削調査を島根県益田市において試みた。その結果、掘削面上に火炎状構造を下底に有する砂の堆積層をみだし、堆積学的・微古生物学的資料に基づきこの砂層は津波の痕跡であることが確認した(Minoura and Nakata, 1994, The Island Arc, v. 3, p. 66-72)。炭素年代測定と産出陶器片から津波の溯上は大凡1000年前と推定され、詳細な地球科学的解析結果を総合して、万寿3年とされる津波襲来の伝承は事実と結論された。日本海中部地震津波による海水の流入により、後潟では堆積砂層中に海水の主成分( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Na}^+$ など)が保存された。これにより地球化学的にも津波襲来の痕跡が識別できるとされたが、海水主成分は可溶性物質であり、それらの堆積層中での保存性が懸念された。万寿津波の痕跡層に関する間隙水分析により、津波砂層中で $\text{Ca}^{2+}$ の明瞭な濃集が確認された。砂には炭酸塩殻生物化石の混入はなく、 $\text{Ca}^{2+}$ は海水起源物質であり、1000年の期間経過後も地球化学的痕跡が保存される事実が明らかにされた(Minoura and Nakaya, 1991, Jour. Geol., v. 99, p. 265-287)。津波襲来を堆積痕跡として認定する基準をより多様化する意味で、この発見は極めて重要であった。

1923年にカムチャッカ半島沖で発生した地震津波は極東太平洋沿岸各地に襲来し、各地に多大な被害を及ぼした。津波の発生は4月であり、カムチャッカ半島の海



岸平野では、この時期に雪原が凍結して厚い氷に被覆される。ソビエト連邦地方行政官記録には、膨大な量の海水が内陸部まで侵入し、氷塊と混合する海水はその後の数ヶ月に亘って平野に滞留したと記されている。箕浦はこの事実に着目し、日本・ロシア・ノルウェーの混成研究者集団を結成して、最も被害が甚大であったとされる Ust'-Kamchatsk 平野を平成4年より3年間にわたり調査した。堆積学的・古生物学的検討結果に基づき、氷面上を溯上する津波が摩擦による運搬能力の減衰を排除されて平野深部にまで侵入したと結論した (Minoura et al., 1996, Sed. Geol., v. 106, p. 145-154)。堆積物を津波の痕跡であると判断する極めて重要な手段として、粒度分析が挙げられる。粒度組成の解析には様々な方法が適用されているが、流体の運搬を考慮する限りにおいて、沈降法が最も優れている (箕浦ほか, 1988, 弘前大学理科報告, v. 35, p. 50-63)。1923 年カムチャッカ半島沖津波による堆積物の粒度分析結果 (Minoura et al., 1996, Sed. Geol., v. 106, p. 145-154) では、内陸側への緩やかな細粒化と2モード分布様式は、底面摩擦を殆ど伴わない津波の溯上を示唆している。細粒砂は浮遊により、また中粒砂は転動により、それぞれ運ばれた。これらの結論は、解像力に優れたエメリー管利用による沈降法によってのみ得られる。この研究では、堆積物の花粉分析も行っており、海水の滞留が森林の植生を壊滅させた事実が明らかにされた。積雪地域への冬季の津波襲来が、直接的な災害とは別に、地表植生を破壊し地下水を汚染する可能性を指摘する初めて提言となった。

エメリー管沈降法による粒子組成の分析は非常に有意義な結果をもたらすのであるが、分析作業が極めて煩雑で、粒度分布の取得に1試料あたり6時間を有する。従って、多量の試料を処理する解析には適していない。流体運動を考慮した分析法の1つに、レーザー回折式分析がある。これは、石英ガラス管内に堆積粒子を懸濁した流体を循環させ、これに 50~60 ステップでレーザー光を照射して統計的に粒度を測定する試みである。測定手法は、極めて効率よく、かつ流体運動を比較的反映した分析法である。本研究では、レーザー回折式粒度分布測定装置 (SHIMADU SALD-3000J) に対応する分析方法を開発し、独自の処理法により津波及び水路実験による堆積物の分析を試みた (第2章参照)。これにより、堆積作用の合理的な解釈が可能となり、数値的解析に必要な粒子運動の初期条件を推定することが可能となった。

### 3. 津波の数値解析

これまでの津波堆積物研究を通して開発した堆積学的及び古生物学的解析法により、津波の溯上過程と溯上による環境事変が高精度で解明されるに至った。津波襲来の地球科学的及び災害科学的意義を究明し、その環境効果を明らかにする目的において、しかしながら堆積物から得られる情報には限りがある。申請者は、この限界を

打破すべく、力学的な側面から津波の襲来とこれによる現象を理解する試みを企てた。全く異なる見地からの検討が、健全な自然科学を目指す上で、非常に重要と考えられるからである。波源の力学的特性の見積もりが妥当である限りにおいて、TSUNAMI-N2 モデルを活用した津波の復元により、見極めが困難な流体力学的情報を得ることが可能となる(例えば, Minoura et al., 2002, Jour. Nat. Dis. Sci., v. 23, p. 83-88)。

1992 年フローレス地震により発生した津波は、Flores 海に面する島々に襲来し、多大な被害を及ぼした。Flores 島の北に位置する Babi 島では、波源の反対側の海岸で著しい津波被害が生じ、6-7 m の波が押し寄せて 600 名以上の人命が失われた。津波が襲来した海岸では津波堆積物が2層確認され、下位の砂層は北から襲来した流れから堆積したのに対して、上位の砂層は南より溯上した津波によりもたらされた。目撃者による聞き取りからは、地震発生後間もなく2波の津波襲来があつて、何れも Flores 島に波が反射した可能性はなく、特に南から押し寄せた津波が大きな被害を及ぼした事実が判明した。我々は、詳細な海底地形図を入手し、この地形データを用いて TSUNAMI-N2 による津波伝搬の数値計算を試みた。その結果、Flores 海で発生した津波は、Babi 島の北側海岸に到達して海岸を浸食する一方、島を外縁する急峻な珊瑚礁斜面に沿って北端で2手に分かれて伝搬し、数分後に反対側で会合してエネルギーを増幅し島の南側海岸に溯上した。この数値的結果は堆積学的解釈及び目撃談と見事に一致しており、力学的評価の意義が強調された (Minoura et al., 1997, Geology, vol. 25, p. 523-526)。到達津波波高の時系列復元結果は、目撃による津波の波高と非常に良く符合している。フローレス地震津波の研究により、孤立珊瑚礁島では波源の反対に位置する海岸で津波波及効果が増大する可能性が明示され、防災上極めて重要な結果を得るに至った。

数値的な津波の復元の意義は、その後に行ったエーゲ海・ティラ火山噴火津波の研究により更に明らかにされた。本研究では、波源の力学的な条件が特定できる津波に関して、一連の研究を通して、十分な精度で津波の伝搬とその諸過程を力学的に解析し得る可能性を示すことができた。



## 第2章

### 869 年貞観地震による津波災害の歴史的考察

#### 津波災害は繰り返す

今から 3500 年前、エーゲ海で巨大な津波が発生し、これによる災害はクレタ文化圏に大きな衝撃を与えたとされている (Minoura et al., 2000)。いくつもの文明が興亡した後の現在でも、それが土地の言い伝えとなっていて残されている。我が国でも、各地に津波災害が伝承され、惨禍は教訓として語り継がれている。陸奥国府に津波が襲来したとする九世紀後葉の記録が残されており、この歴史上の津波を、歴史的な観点で解明を試みた。

#### 陸奥国府を襲った貞観年津波

三代実録(日本紀略, 類聚国史百七十一)の貞観 11 年 5 月 26 日(西暦 869 年 7 月 13 日)の記録に、次の注目すべき災害の発生が記されている。「陸奥国地大震動。流光如晝隱映。頃之。人民叫呼。伏不能起。或屋仆壓死。或地裂埋殮。馬牛駭奔。或相昇踏。城郭倉庫。門櫓墻壁。頽落顛覆。不知其数。海嘯哮吼。聲似雷霆。驚濤涌潮。洄洑漲長。忽至城下。去海数千百里。浩々不辨其涯俟矣。原野道路。忽為滄溟。乗船不遑。登山難及。溺死者千許。資産苗稼。殆無子遺焉。」内容は、光を伴った鳴動と共に大地震が起き、次いで押し寄せた津波は平野の奥深くまで侵入して陸奥国府の城下まで達し、1000 名を越す犠牲者が出た、と解説される。この事件より 120 年前の天平 21 年(西暦 749 年)春、今の宮城県小田郡湧谷で黄金が多量に出土し、辺境とされた陸奥は時の権力にとり一躍最重要の地域となった。以来この地では、黄金を求めた朝廷と先住民との間に軋轢が増し、やがて抗争へと発展していったのである。平安を願った東大寺大仏建立の成就には豊かな黄金を不可欠とし、人々の利害の先鋒で戦乱が繰り返された。支配国家の強制に翻弄された地方豪族の、受け入れざる歴史の悲哀をみる思いがする。更なる策謀と遺恨が対峙して各地で世情の不安が募るなか、仙台湾の沖で発生した地震津波が襲来したのである。当時の朝廷が受けた衝撃の大きさは、この災害の詳細な記録からも伺える。

被災した国府はどこにあったのであろうか。貞観の地震津波に関する言い伝えや逸話などを各地で見聞するが、その実体についての信頼に足る歴史的記述は意外に希である。正史の記録にある城下を陸奥多賀国府の館と読みとれるものの、その地理的位置に関しては諸説がある。これまで主流とされてきた現在の多賀城市とする説に対して、多くの歴史的記述を背景として異論を侍した渡邊偉夫氏は、岩沼の「武隈の館」をその場所とする解釈を提唱している(渡辺, 2000)。現在ではそれぞれ仙台北野

の北部と南部に位置しており、何れにしても 1100 年ほど前に仙台平野に津波が押し寄せたことに変わりはない。平野が氾濫して青海原が出現したとする記述は、膨大な量の海水の溯上により仙台平野が広範囲に水没した様子を暗示していると言える。

この津波災害に関わる伝承・記録は東北地方から房総半島にかけての太平洋沿岸の広い範囲に及んでおり(渡辺, 2000), 知られ得る限り最大級であったと考えられる。東北日本で近代的観測が始まって以来最大級の津波の場合で、海岸より2kmに満たない海水の陸上溯上距離である。歴史資料が示す平野の水没は、貞観津波が常識を越えて遙か内陸部まで溯上したことを示唆している。貞観の津波は、説明の及ばない自然現象なのであろうか。

海岸平野では急速な市街化が進み、現在では海岸域にまで開発が及んでいる。こうした状況にあって未曾有の津波襲来が予想されるならば、我々はその時期と規模を理解することが急務であると認識しなければならない。貞観津波の解明は、破局的自然現象としての津波の科学的理解に貢献するのみならず、地域の防災上極めて重要となるのである。

### 津波災害の痕跡

北と南から流下する北上・阿武隈両大河と奥羽脊梁山脈に起源する数条の河川による埋積作用により、仙台平野は作られた(Matsumoto, 1985)。良く知られているように、伊達政宗の仙台開府以来、平野の後背湿地をひたすら排水することにより、現在の広大な耕地が開拓された。記述にあるごとく仙台平野に貞観の津波が押し寄せていれば、年代論的に、耕地の下に津波の溯上が痕跡として残されていることになる。この期待を持って発掘を試みたところ、厚さ数cmの砂の層が仙台平野の広範囲に亘って分布している事実が明らかにされた(Minoura and Nakaya, 1991)。様々な地球科学的分析により、砂は津波によって運ばれ堆積したと結論された。地層に含まれる木片の放射性炭素年代は、砂層の堆積年代が貞観の時代を示唆している。同様の砂層が相馬市でも発見され(菅原大助ほか, 2001), 津波堆積層の広がりから正史の記録に誇張はないと判断され、津波は仙台平野を水浸しにしたのは事実のようである。

最近、多賀城市埋蔵文化財調査センターにより、市川橋遺跡から九世紀後葉の大規模な津波災害の跡が発掘されたと報じられた(多賀城市文化財調査センター, 2000)。この発見により、多賀の国府城下に貞観の津波が押し寄せて大きな被害が発生した事実が、明らかとなった。歴史上の津波災害の実態が学際的な研究を通して解明される事例を、貞観の事件にみることができたのである。

### 津波災害の再来

津波発生の理工学的解析を試み、貞観津波の数値的復元に成功した(図版 I)。



これにより、仙台平野の海岸で最大で9mに達する到達波が、7ー8分間隔で繰り返し襲来したと推定された (Minoura et al., 2002)。結果は、相馬市の海岸には更に規模の大きな津波が襲来したことを示唆している。将来予測は災害科学の最大の目的である。大きな津波が仙台湾沖で将来発生する可能性があるとして、その時期は何時頃であろうか。再来予測を可能ならしめる科学的根拠を再び地質学に求めることができる。

本研究費により導入したジオスライサーを用いて仙台平野の表層を掘削したところ、各地からの堆積物試料中に厚さ数cmの砂層が3層確認され、一番上位は貞観の津波堆積物である事実が明らかと成った (図版 II)。他の何れも、同様の起源を有する津波の堆積物である。放射性炭素を用いて年代を測定したところ、過去 3000 年間に3度、津波が溯上したと試算された。これらのうち先史時代と推定される2つの津波は、堆積物分布域の広がりから、規模が貞観津波に匹敵すると推察される。津波堆積物の周期性と堆積物年代測定結果から、津波による海水の溯上が 800 百年ー1100 年に1度発生していると推定された。貞観津波の襲来から既に 1100 年余の時が経ており、津波による堆積作用の周期性を考慮するならば、仙台湾沖で巨大な津波が発生する可能性が懸念される。

伝承や文献記録の内容が全て真実であるとは限らない。しかしながら、1100 年余の時を経て語り継がれた仙台平野での災害の発生は、幸運にも、津波の科学研究を通してその正当性が実証された。こうした破壊的な災害には、数世代を経ても、あるいは遭遇しないかもしれない。しかし、海岸域の開発が急速に進みつつある現在、津波災害への憂いを常に自覚しなくてはならないであろう。歴史上の事件と同様、津波の災害も繰り返すのである。

## 引用文献

- Matsumoto, H., Beach ridge ranges and the Holocene sea-level fluctuations on alluvial coastal plains, northeast Japan. Science report of the Tohoku University, 7th Series (Geography), vol. 35, p. 15-46, 1985.
- Minoura, K. and S. Nakaya, Traces of tsunami preserved in inter-tidal lacustrine and marsh deposits: Some examples from northeast Japan. *Journal of Geology*, vol. 99, p. 265-287, 1991.
- Minoura, K., Imamura, F., Kuran, U., Nakamura, T., Papadopoulos, G.A., Takahashi, T., and Yalciner, A.C.: Discovery of Minoan tsunami deposits. *Geology*, vol. 28, p. 59-62, 2000.
- Minoura, K., Imamura, F., Sugawara, D., Kono, Y., and Iwashita, T., 2002, The 869 Jogan tsunami deposit and recurrence interval of large-scale tsunami on the Pacific coast of northeast Japan. *Jour. Nat. Dis. Sci.*, vol.

23, p. 83-88.

菅原大助・箕浦幸治・今村文彦, 西暦 869 年貞観津波による堆積作用とその数値復元. 津波工学研究, No. 18, p. 1-10, 2001.

多賀城市文化財調査センター, 市川橋遺跡—城南土地区画整理事業に伴う発掘調査略報2. 多賀城市文化財調査報告書第 59 集, p. 1-15, 2000.

渡辺偉夫, 896(貞観 11)年の地震・津波と推定される津波の波源域. 津波工学研究報告, vol.17, p. 27-37, 2000.



### 第3章:津波堆積物により明らかにされた貞観津波の実態

#### はじめに

東北日本の太平洋沿岸には太平洋プレートとユーラシアプレートの沈み込み境界が形成する日本海溝が存在し、これに沿って数多くの歴史地震が発生してきたことが知られている(図 1 A・B). 歴史記録には地震による直接の被害に加えて、海底地震に伴って発生した大津波による被害もしばしば記述されている。

西暦 869 年 7 月 13 日(貞観 11 年 5 月 26 日)に発生した貞観津波は、これまでに東北日本に襲来した最大級の津波の一つであったと考えられている。六国史のうちの一篇である「日本三代実録」には、古代多賀城を襲った大地震・大津波の様子が記されており、地震動と津波襲来により建造物の損壊が生じ、およそ 1,000 人の人命が失われたことが述べられている。当時の東北日本は人口希薄な土地であったこと考えると、想像を絶する被害であったことが伺える。また、三代実録には『原野道路、総為滄溟』との注目すべき記述がある。これは、多賀城一帯(仙台平野)が津波により広い範囲に渡って浸水したことを示していると考えられる。

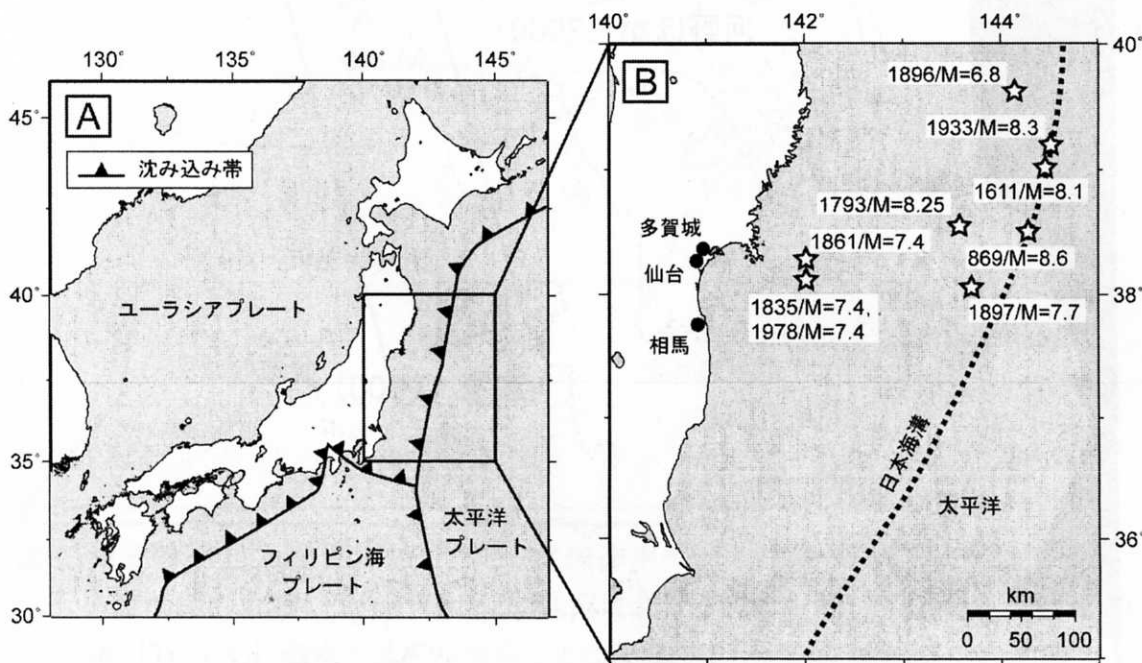


図1. [A] 日本列島周辺の沈み込み帯. [B] 東北日本太平洋沿岸で発生した主な歴史地震の震源と推定マグニチュード(渡邊, 1985).

既往の研究により、貞観津波の溯上によって堆積したと考えられる砂層が仙台平野

において海岸から内陸 3～4 km の範囲に見出されており、三代実録にある記述が真実であったことを示唆している (Minoura & Nakaya, 1991). 箕浦 (1990) は津波堆積物と歴史史料の調査に基づき、貞観津波の波源域を仙台湾沖の大陸棚斜面に推定した。羽鳥 (1998)・河野 (2000)・渡邊 (2000) による最近の研究では、歴史史料と数値モデルによる津波の伝播計算に基づいて貞観津波の波源域を検討しており、マグニチュード 7.5～8.5 の震源を仙台湾内・宮城県沖・日本海溝沿いに推定している (図 2)。

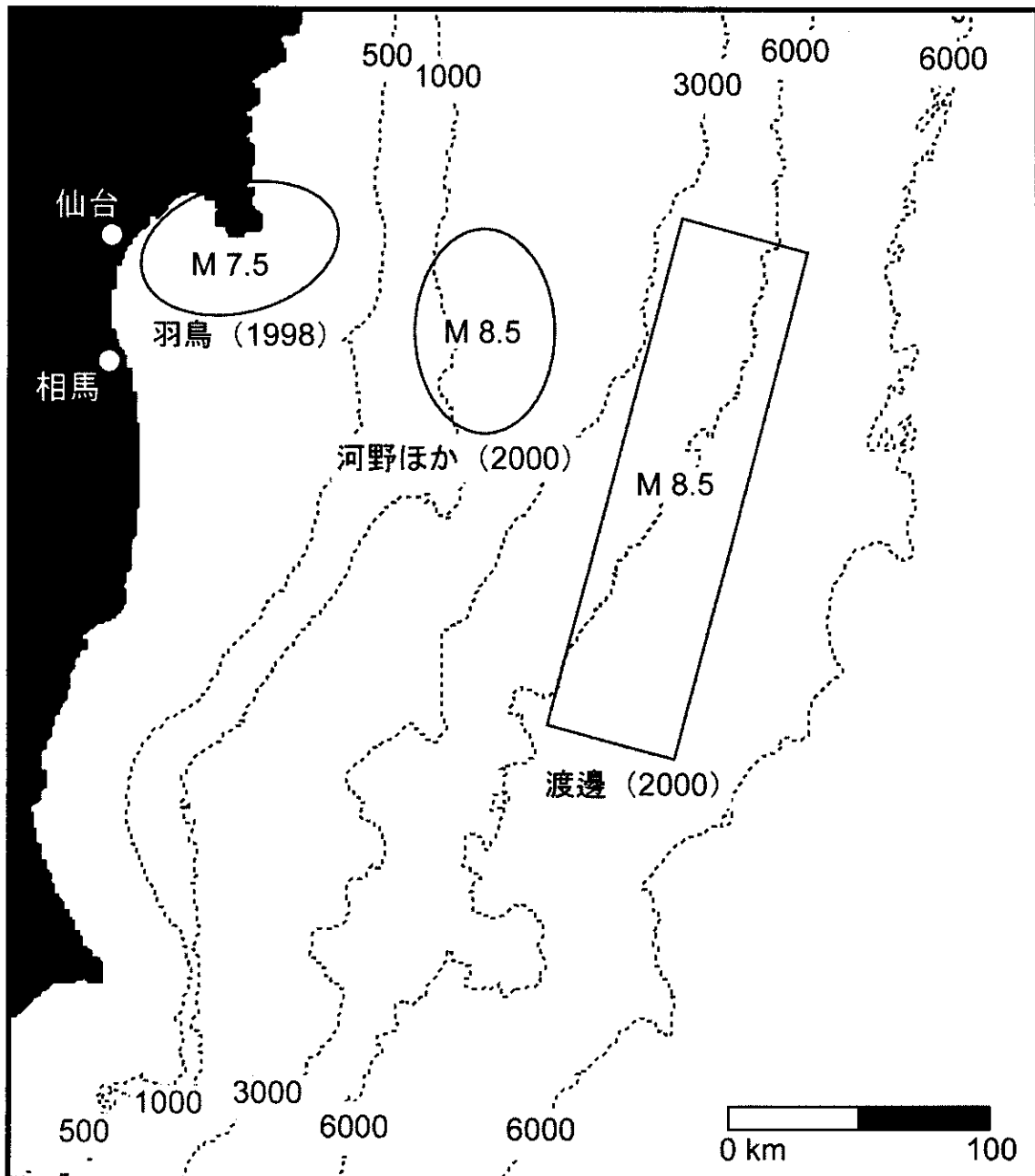


図2. 既往研究により推定された貞観地震の震源と津波の波源域。

これまでの研究により、世界各地の海岸域で様々な時代の津波堆積物が発見されており、また最近数十年間に発生した津波の現地調査を通して、津波の堆積作用についての理解が深められている(図3)．ここで示した典型的な堆積作用の他にも、地形や気象条件によっては特異な堆積作用が生じることも知られている．例えば、1923年のカムチャッカ地震津波では、内陸3 km まで津波が溯上し、薄い砂層を残したことが明らかになっている(箕浦, 1996)．この堆積作用は、植生のない凍結した地表面を津波がエネルギーを減衰させることなく遡上した結果生じたと考えられている．貞観地震・津波に関しては、当時の仙台平野は大部分が湿地帯で占められ、植生に覆われていたと思われる．三代実録によれば貞観津波は夏季に発生しており、前述のカムチャッカにおける事例のような津波の溯上を容易にする特殊な条件は存在しなかったと考えられる．にもかかわらず仙台平野に津波堆積物が広範囲に分布していることから、海岸に到達した貞観津波の規模は常識をはるかに超えるものであったか、または津波の溯上に伴い未知の自然過程が生じたことが示唆される．

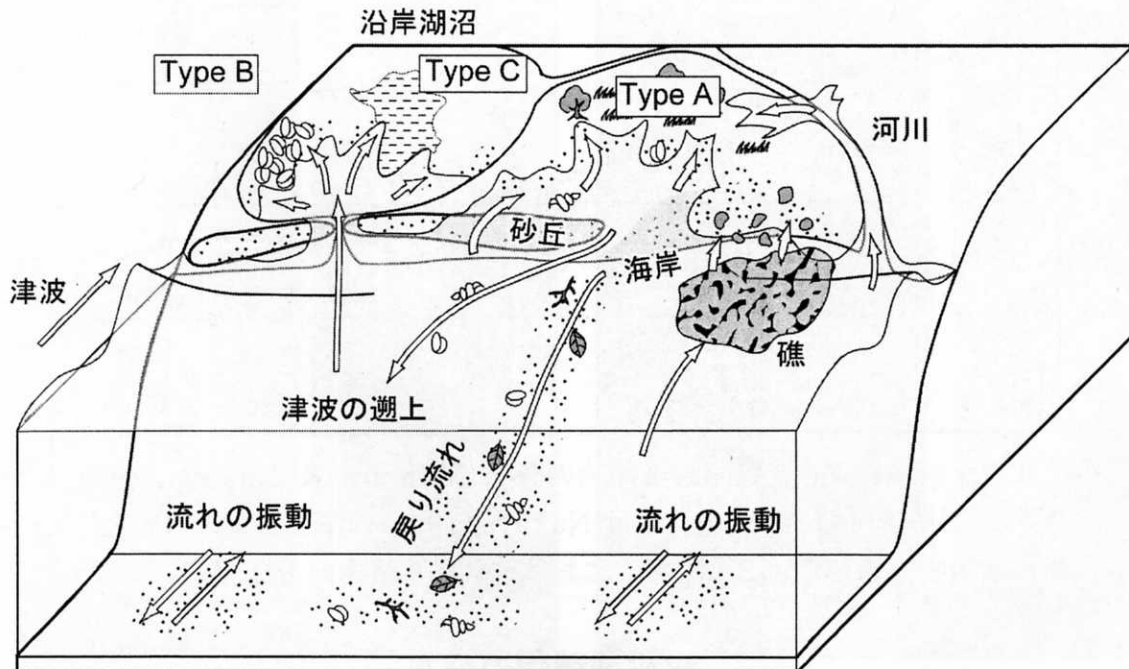


図3. 津波の溯上により海岸域で生じる堆積作用モデル. [Type A] 後背湿地における海浜砂の堆積. [Type B] 沿岸湖沼における底棲生物(殻・遺骸を含む)の集積. [Type C] 海水と淡水の混合による塩類の析出と沿岸湖沼底への沈殿.

宮城県沖では、今後 30 年以内に高い確率で大地震が発生することが指摘されている．近年急速に都市化が進み、海岸域まで開発が及んだ仙台平野に巨大な津波が襲来することを踏まえるならば、その時期や規模を予測することの重要性は非常に高



い. 東北日本を襲った最大級の歴史津波である貞観津波に関する知見を深めることは、今後防災対策を講じる上で極めて重要であると考えられる. そこで、本研究では貞観津波堆積物の地質学的分析と数値モデルによる波源域の検討を行い、貞観津波の実態の究明を試みた.

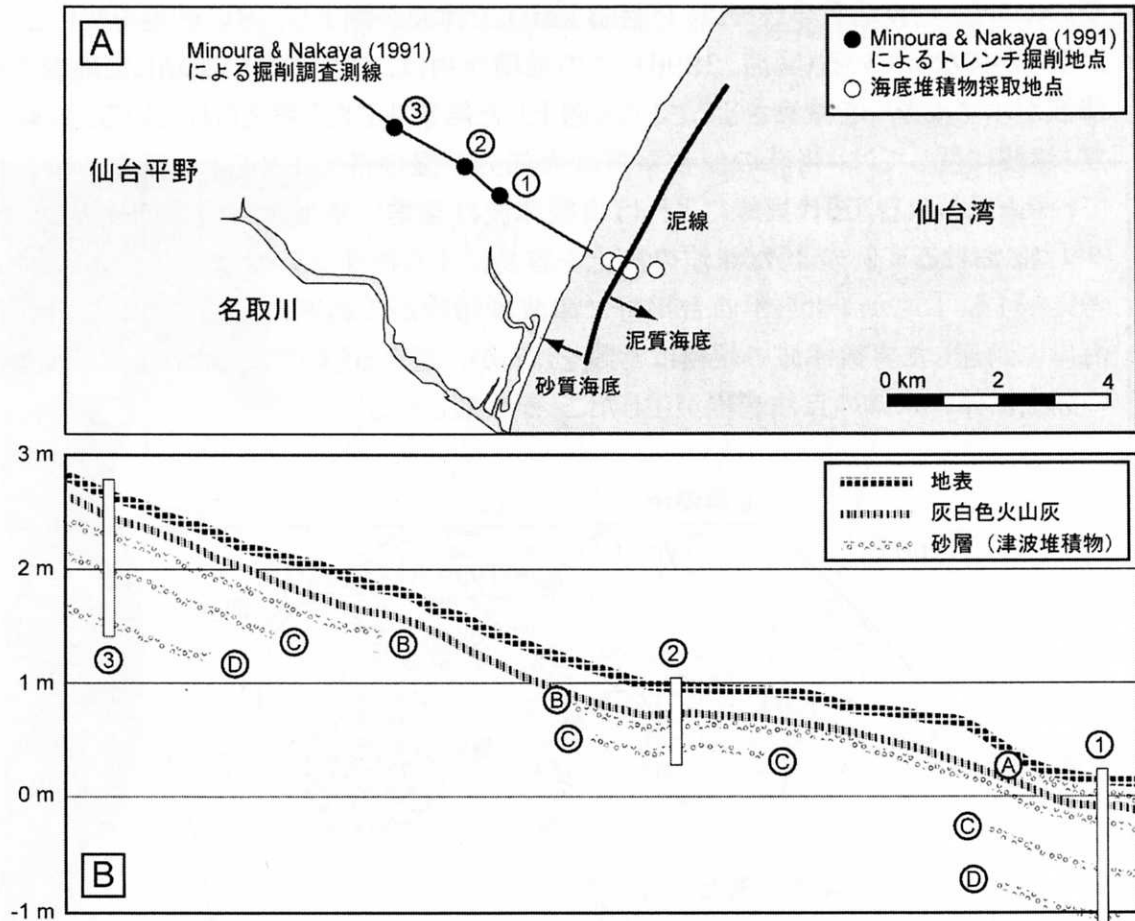


図4. 仙台平野における貞観津波堆積物の分布 (Minoura & Nakaya, 1991 より改変して引用). [A] Minoura and Nakaya (1991) の調査測線と本研究による海底堆積物採取位置. [B] 測線上における津波堆積物の分布状況.

### 津波堆積物の分布

仙台平野における貞観津波堆積物の追跡指標としては、宮城県内に広く分布する新期の灰白色火山灰(山田・庄子, 1981)が極めて有効である(箕浦・中谷, 1991; 阿部ほか, 1990). この灰白色火山灰層直下の泥炭から得られた $^{14}\text{C}$ 年代は  $1170 \pm 80$  年B.P.を示しており、A.D. 871 年の鳥海山の噴火、またはA.D. 873 年の鬼頭火山の噴火によって降下したと考えられている. 箕浦・中谷(1991), 阿部ほか(1990)はこの灰白色火山灰の下位から貞観津波により堆積した砂層を検出した. 海岸線と直交する測線上における試錐とトレンチ掘削により、この砂層は海岸から内陸 3 ~ 4 kmま

でほぼ連続的に追跡されている。また、海岸付近で厚さ数 10 cm の砂層は陸側に薄化しつつ分布していることが確認されている(図4)。

本研究では、仙台港から名取川河口にかけての水田地帯においてジオスライサーを用いた表層堆積物の掘削調査を行い、貞観津波堆積物の分布特定と堆積学的方法による分析を行った。野外においてジオスライサーで採取した柱状試料を肉眼観察し、灰白色火山灰とその下位に存在する砂層の堆積物試料を採取した。ジオスライサーによる津波堆積物掘削調査の状況を図 5 に示す。調査範囲は主に水田として利用されているため、地表面からおおよそ 10 cm は砂質または泥質の土壌であった。海岸付近で砂層は厚く、ジオスライサーではその基底まで採取することは困難であったが、内陸側では砂層が薄化し、上下の境界を含めて試料採取・観察することが可能であった。

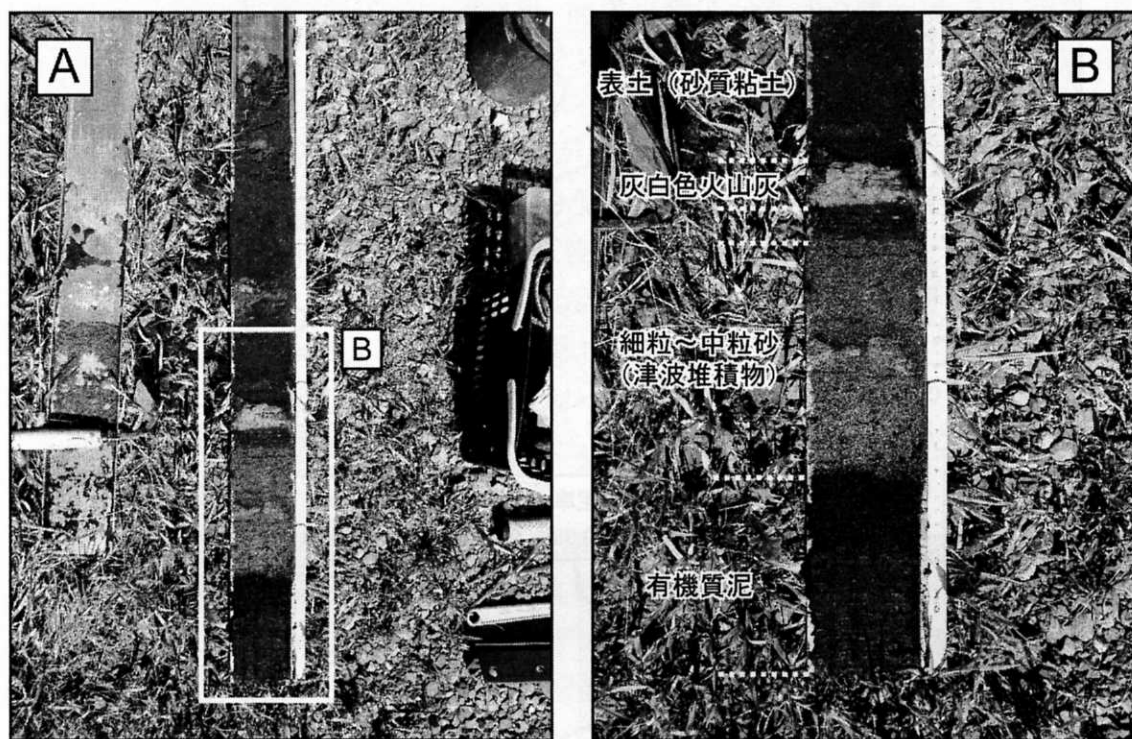


図5. [A] [B] ジオスライサーで採取した津波堆積物。有機質泥層中に砂層が挟在し、これを年代指標となる灰白色火山灰層が覆う。

灰白色火山灰層は地表面からおおよそ 15 ～ 50 cm の位置に存在し、数 cm の厚さを有する。灰白色火山灰層は測線上で連続的に追跡されなかったが、これは火山灰の堆積が湿地や沼のような比較的穏やかな環境に限定されるためと思われる。砂層は主に当時の後背湿地に相当する範囲で連続的に追跡された。砂層は深さ約 20 ～ 60

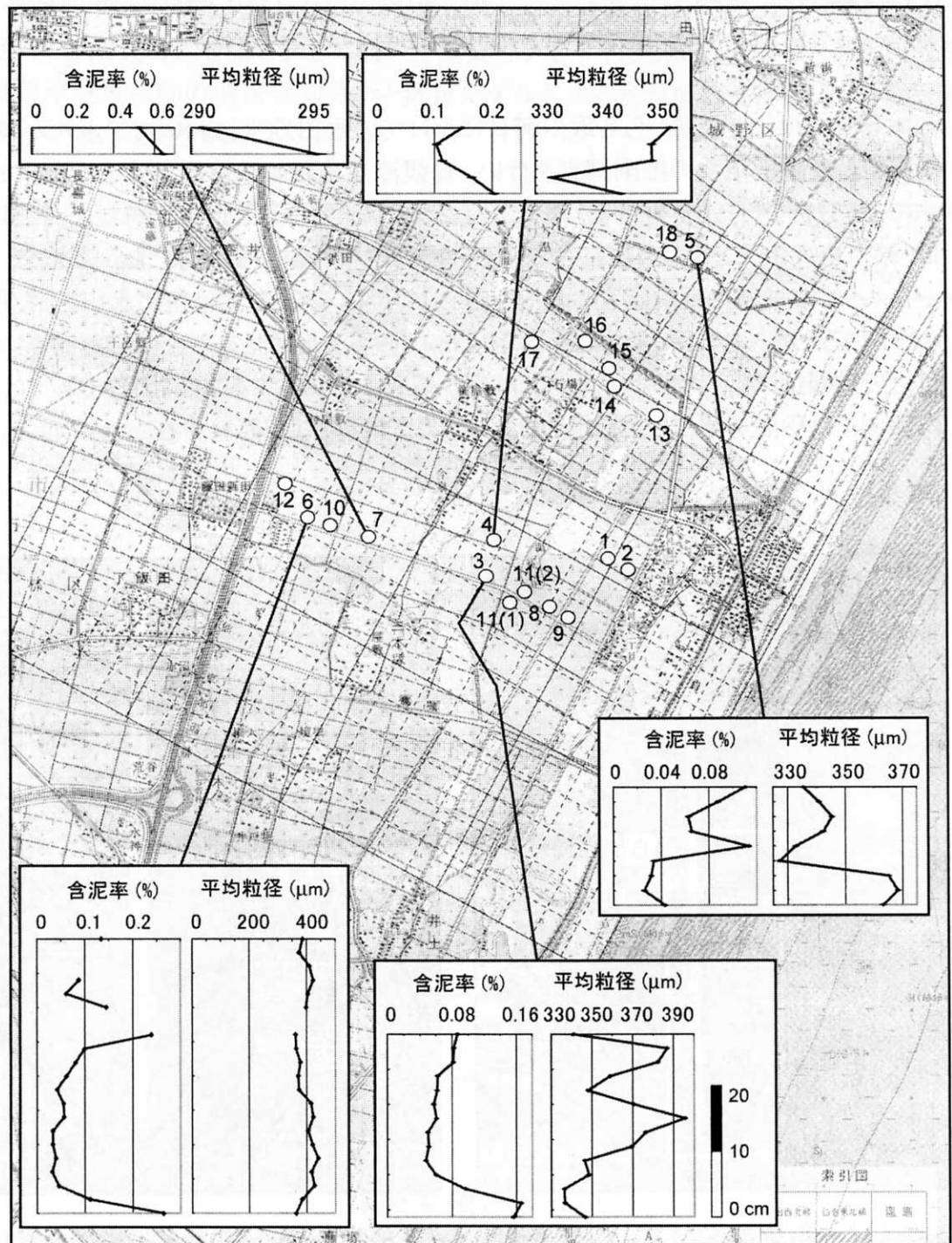


図6. 本研究で実施したジオスライサーによる掘削位置，並びに主な地点における砂層（津波堆積物）の含泥率・平均粒径の鉛直変化。

cm に存在し，海岸からおおよそ 1.5 km の地点で厚さ 10 cm，2.0 ～ 2.5 km の地点では数 cm 程度であった．砂層中には葉理構造・堆積粒子の分級などの堆積構造は見られず，急激な堆積作用により砂層が形成された事を示している．いくつかの地点で



は砂層の上下に灰白色火山灰が検出されており、耕作により堆積物が擾乱を受けていることを示している。堆積物の大部分は泥または腐植泥から成っており、これと砂層との境界はほとんどの地点できわめて明瞭であった。

仙台平野における17箇所の掘削地点のうち7地点について、津波堆積物の堆積学的特徴を図6に示す。津波堆積物試料について含泥率と粒度分布の測定を行った。粒度分布の測定にはレーザー回折式粒度分析装置を用いた。すべての地点において津波堆積物の含泥率はきわめて小さく、津波の溯上は細粒粒子の沈降が生じない程度の大きい流速を持っていたことを示している。平均粒径は海側の掘削地点で大きく、陸側の地点では小さくなっている。また、陸側では平均粒径の鉛直変化は小さいのに対して、海側では  $300\text{--}400\text{ }\mu\text{m}$  の範囲で上方または下方に向かう粒径の増大が認められる。津波堆積物の層厚が大きく粒径の鉛直変化が小さい陸側の地点6では、比較的定常的な溯上が長時間継続したことを示していると考えられる。一方、堆積物の粒径が大きく、平均粒径が鉛直方向に大きく変化する海側の地点3・4・5では、流れの非定常性が強かったことが示される。海岸平野に分布する津波堆積物では、陸側に向かって層厚と平均粒径が減少するという典型的な特徴が知られている。これは、斜面上で流れのエネルギーが漸減するという一般的な性質による。貞観津波の堆積物では、陸側に向かって粒径が小さくなるが、層厚の変化に同様の傾向は認められない。また、これらの地点では層厚が比較的小さいことから、堆積物の沈降が強い流れにより阻害された可能性、あるいは堆積直後に侵食を受けた可能性を示している。従って、仙台平野に溯上した貞観津波による流れの特性は、海岸付近と浜堤列の陸側で大きく異なっていたと考えられる。非定常性の強い流れは海浜だけでなく浜堤列まで及び、これにより大量の砂が巻き上げられて運搬された可能性がある。陸側では流れの非定常性は比較的弱く、溯上にともなって流れのエネルギーが減少し、砂が堆積したと思われる。

図6の地点7で示した位置から採取した津波堆積物試料については、これに含まれる珪藻殻の分析を行った(図7・左)。その結果、砂層からは海岸・河口付近の環境に生息する海水・汽水性の珪藻殻が、その上下の泥質堆積物中からは淡水・汽水性の珪藻殻が検出された。このことから、海浜に起源を持つ砂が内陸に運搬され、急激に堆積した結果この砂層が形成されたことが推定される。貞観津波当時、仙台平野は小河川・湿地とそれを覆う植生で占められていたと思われる。砂層は内陸3～4 kmに達する広範囲に分布しており、植生による流体力の減衰を考慮すると、仙台平野に溯上した津波の海岸部における波高は非常に大きいものであったと考えられる。

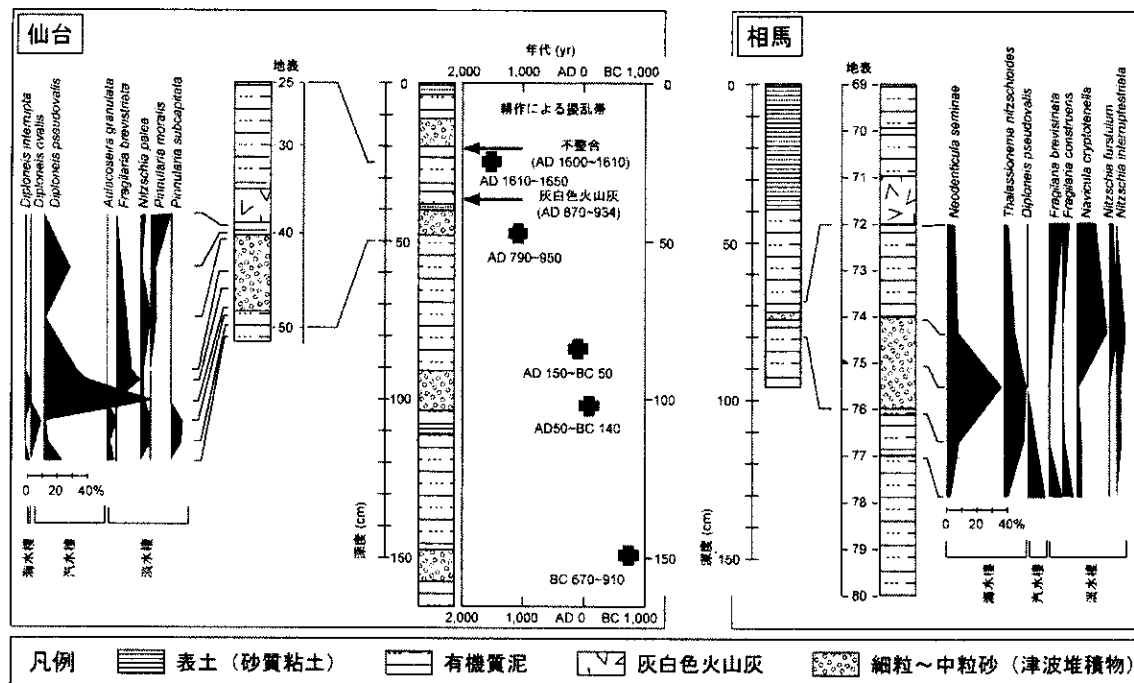


図7. 津波堆積物中の珪藻分析結果.

仙台にて得られた結果をもとに名取川の南方へ調査範囲を広げ、貞観津波堆積物の搜索を行った。河川の氾濫や侵食作用・近年の地形改変により津波の痕跡を発見することは困難であったが、搜索の結果、福島県相馬市の松川浦付近で仙台平野と同様の堆積層を検出した。相馬市松川浦における柱状断面を図7(右)に示す。地表面からの深さ71 cmの位置に厚さ1 cmを有する灰白色火山灰状の堆積物、その下位に泥質堆積物、深さ74～76 cmに細粒砂堆積物が見出された。仙台平野と同様に泥質堆積物と砂層の境界はきわめて明瞭であった。仙台平野で検出した砂層と同様に、相馬で採取した柱状試料について、砂層とその上下の泥質堆積物に含まれる珪藻殻の分析を行った。砂層からは、水深数10 mから100 mに相当する沖浜から陸棚域に生息する海生珪藻が検出され、泥質堆積物からは陸上環境を示す汽水または淡水性の珪藻殻が検出された(図7)。通常の堆積作用では海洋陸棚域に生息する珪藻殻が陸上の表層に堆積することはない。この結果から、砂層の堆積時に海洋陸棚域または沖浜から海岸域に達する海水の流れがあったことが示唆される。水深数10 mから100 mの海底に堆積していた砂が海水とともに運搬され、相馬の海岸付近の低湿地に砂層として堆積したと解釈される。この砂層には陸生の珪藻殻は含まれないため、堆積の際に陸域の堆積物が砂層と混合する環境は無かったと思われる。

福島県相馬市で発見した堆積層は仙台平野における津波堆積層と類似し、この砂層の起源が津波によるものである可能性が示された。そこで、相馬において砂層の上部に見出された灰白色火山灰状堆積物と、仙台平野において検出した灰白色火山灰の対比を行い、砂層の対比の妥当性を検証した。それぞれに含まれる火山ガラスを、

光学顕微鏡を用いて拾い出し、浸液法によって屈折率を測定して山田・庄子(1981)に示されている分析結果と比較した。灰白色火山灰の屈折率は、仙台平野で採取したものが1.500～1.504、福島県相馬市で採取したものが1.497～1.502であり、両者はほぼ一致している。山田・庄子(1981)は、鳴子町川渡で得た灰白色火山灰試料から屈折率1.494～1.498、多賀城市浮島で1.494～1.503、仙台市根岸で1.489～1.498、岩沼市東谷地で1.494～1.498という結果を示しており、これらは本研究の結果とほぼ重なる。また、ガラスのEPMA分析を行い、結果を両地点間で比較したところ、 $K_2O$ の含有率に差が見られる以外、化学成分は良く一致していた。この差は堆積場における灰白色火山灰の保存条件の差によるものと思われる。東北南部には同時代の他の火山性降下物が存在することは知られていないので、仙台平野と福島県相馬市にて検出した灰白色火山灰層は山田・庄子(1981)に報告されているものと同一であり、これよりも下位に存在する砂層の堆積年代はA.D. 871またはA.D. 873年以前と判定される。したがって、相馬において検出した砂層の堆積年代は貞観津波の発生年代と矛盾が無いことが示され、またその起源は水深数10～100 mの沖浜から海洋陸棚域に推定されたことから、砂層は貞観津波による堆積物であるとの解釈は妥当であろう。相馬における貞観津波堆積物の発見は、津波による土砂の運搬・堆積現象が仙台から相馬にかけての広い範囲で生じたこと、海岸部に到達した津波の波高がきわめて大きかったことを示すものと思われる。

### 堆積物の分布と数値モデルに基づく津波規模の検討

三代実録の貞観地震・津波に関する記事には、地割れが生じ、城郭・倉庫・門櫓・土壁が崩れ、圧死者が出たとの記述がある。羽鳥(1998)はこの記述から、仙台平野における震度を5～6と推定し、さらに他の歴史津波との比較から貞観地震のマグニチュードMを7.5、津波の波源域を仙台湾内に推定した(図2)。仙台湾内に波源域がある場合、津波は波高をさほど増幅されることなく陸地に到達する。これとM7.5の地震による断層の垂直変位を考慮すると、このモデルでは仙台平野から福島県相馬にかけての範囲で津波の遡上・堆積現象が生じたことを説明するのは困難であると考えられる。渡邊(2000)は、宮城県気仙沼市から茨城県大洗町にかけての東北日本太平洋沿岸部に残る貞観津波に関する伝説・伝承を精査し、地震のマグニチュードMを8.5、日本海溝沿いの長さ200 km、幅50 kmの領域に波源域を推定した(図2)。これは貞観津波の波源モデルとしては考えうる最大規模のものであり、陸上に残されている津波堆積物の存在を無理なく説明できるとと思われる。河野(2000)は1978年宮城県沖地震型の断層モデルにM8.5を与えた津波数値実験の結果が、三代実録中の仙台平野の浸水記録と一致することを示したが(図2)、宮城県沖型の断層モデルにM8.5を考慮することはやや非現実的であると思われる。

村松(1969)は、日本で起こった歴史地震について地震の震度とマグニチュードM、



震央距離  $r$  (km)に関する関係式を示している.

震度 5 以上の地震に対し

$$\log r \text{ (km)} = 0.50M - 1.85 \quad (1)$$

震度 6 以上の地震に対し

$$\log r \text{ (km)} = 0.68M - 3.58 \quad (2)$$

東北日本太平洋側を襲った歴史津波のうち大規模なものは、いずれも大陸棚斜面下部から日本海溝を震源とする地震により発生している。仙台平野から日本海溝までの距離はおよそ 200 km である。陸上での地震動の大きさを少なめに見積もって震度 5 とし、波源域を日本海溝沿いに置くと、(1)式を適用して地震のマグニチュード  $M$  はおよそ 8.3 と決定される。仙台平野と福島県相馬に貞観津波の堆積物が残っていることを考えると、この領域で津波波高が大きくなるように波源域を配置する事は妥当であろう。さらに渡邊(2000)の伝説・伝承が残っている範囲を考慮し、断層の長さ  $L$  を 200 km と仮定して大陸棚斜面下部から日本海溝の領域に波源域を設定した。

ここで、 $M \geq 5$  の浅発地震に対する断層の主要パラメーター間の関係式(佐藤, 1979)

$$\log S = M - 4.07$$

$$\log U = 0.50M - 1.40$$

$S$ : 断層の面積(km<sup>2</sup>),  $U$ : 断層変位量(m)

を用いて、断層幅は  $S = L \times W$  から  $W = 85$  km, 垂直変位  $U$  は 5.6 m と決定される。さらに渡邊(1985)による津波カタログと東北日本の歴史地震の推定パラメーター(佐藤, 1989)を参考に、地震のメカニズムは東西圧縮場における逆断層型と仮定し、断層面の深さ  $H$  を 1 km, すべり角  $\lambda$  を 90°, 断層面の傾斜角  $\delta$  を 45° と決定した。

以上の条件から計算される海底変位を初期波形とし、貞観津波の数値復元を行った。津波の数値計算には東北大学工学部で開発された TSUNAMI-N1 コード(首藤ほか, 1990)を用いた。これは線形長波方程式に基づいており、浅海域の非線型効果・陸上溯上の計算は含まれていない。計算領域は北緯 35° から 39°, 東経 140.5° から 145° の範囲で、空間格子間隔は 1,000 m, 時間格子間隔は 2 秒とした。図8に数値実験によって得られた津波高さ最大値の等高線(1.0 ~ 5.0 m)を示す。渡邊(2000)にまとめられている貞観津波に関する伝説・伝承は、宮城県気仙沼市から茨城県大洗町にかけての範囲に存在するが、この中で津波の遡上・被害の記述と思わ

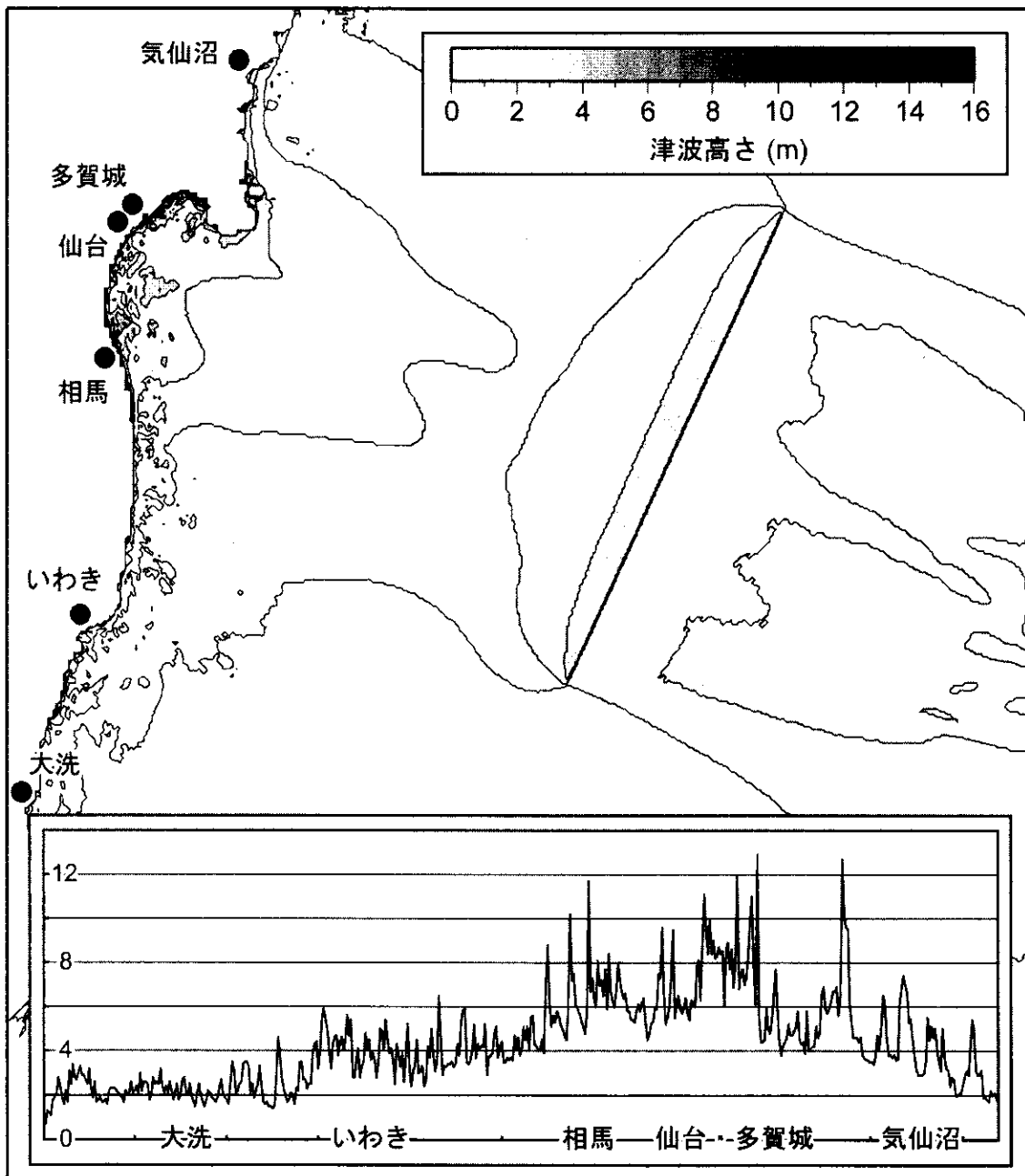


図8. 数値モデルによる貞観津波の復元.

れるものは気仙沼から福島県新地町(相馬市の北隣)にかけてであり、その数も多い。海岸に到達した津波の波高はこの範囲で大きかったと推定される。図8に示すように、海岸線に沿った津波の高さは、大洗から相馬にかけて約2～4 m、相馬から気仙沼にかけては約6～12 mとなった。数値計算によって得られた津波波高の分布と、伝承に残る被害記録の傾向はおおむね一致する判断される。現在までになされている貞観津波の痕跡高の数値的な検討は、阿部ほか(1990)による仙台平野で2.5～3.0 mとした推定のみである。これは津波堆積物の存在限界である内陸3～4 kmの地点にお

ける標高値であり、海岸付近での津波波高はこれを数 m 以上は上回っていたと考えられる。数値計算では相馬よりも北の領域で 6 ~ 12 m の波高を得ており、本計算の波源モデルにより仙台平野における津波堆積物の広範囲な分布を説明することは十分に可能であると思われる。

### おわりに

野外調査により、仙台平野において貞観津波の堆積作用は局地的な現象ではなく、平野全体に及ぶ大規模なものであったことが明らかになった。福島県相馬市においても津波堆積物が検出されたことから、津波の溯上と陸上への土砂の運搬は仙台平野から相馬にかけての広い範囲で生じた可能性があることが分かった。また、多賀城跡市川橋遺跡で発見された水害の痕跡を調査した結果、痕跡とともに発見された泥質砂層の堆積年代が貞観津波の発生年代と一致することを示し、津波が河川を伝播・氾濫することにより砂層が形成された可能性を指摘した。さらに、三代実録にある地震被害の記述と既往の研究による波源モデルを参考に新たに貞観津波の波源モデルの推定を行い、津波の数値復元を行った。得られた波高分布は歴史記録に残る津波被害をうまく説明し、野外調査によって明らかになった津波堆積物の存在範囲と調和的であることが示された。この数値計算には津波の陸上溯上の計算は含まれていない。これを実行し、貞観津波による堆積物の移動・分布を解明することが今後の研究課題となる。

### 参考文献

- 阿部邦昭(1986), 日本海中部地震津波の河川溯上調査. 津波防災実験所研究報告, 第 3 号, 89-101.
- 阿部壽・菅野喜貞・千釜章(1990), 仙台平野における貞観 11 年(869 年)三陸津波の痕跡高の推定. 地震, 第 2 輯, 第 43 巻, 513-525.
- 羽鳥徳太郎(1998), 貞観 11 年(869 年)宮城多賀城津波の推定波源域. 月刊海洋(号外), No.15, 167-171.
- 河野幸夫・村上弘・今村文彦・箕浦幸治(2000), 貞観津波と海底潜水調査. 東北地域災害科学研究, 第 36 巻, 115-122.
- 箕浦幸治(1990), 東北日本における巨大津波の発生と周期. 歴史地震, 第 6 号, 61-76.
- Minoura K. and S. Nakaya (1991), Traces of tsunami preserved in inter-tidal lacustrine and marsh deposits: Some examples from northeast Japan. *Journal of Geology*. Vol.99, No.2, 265-287.
- Minoura K., Gusiakov V.G., Kurbatov A., Takeuti S., Svendsen J.I., Bondevik S. and Oda T.(1996), Tsunami sedimentation associated



with the 1923 Kamchatka earthquake. *Sedimentary Geology*, 106, 145-154.

村松郁栄(1969), 震度分布と地震のマグニチュードの関係. 岐阜大学教育学部研究報告, 自然科学, 4, 168-176.

Sato R. (1979), Theoretical basis on relationships between focal parameters and earthquake magnitude. *Journal of Physics of the Earth*, 27, 353-372.

佐藤良輔 編著(1989), 日本の地震断層パラメター・ハンドブック. 鹿島出版会.

Shuto N., Goto C. and Imamura F. (1990), Numerical simulation as a means of warning for near-field tsunamis. *Coastal Engineering in Japan*, Vol.33, No.2, 173-193.

多賀城市埋蔵文化財調査センター(2000a), 市川橋遺跡一城南土地地区画整理事業に伴う発掘調査略報 2ー. 多賀城市文化財調査報告書第 59 集, 1-16.

多賀城市埋蔵文化財調査センター(2000b), 市川橋遺跡第 27 次調査一現地説明会資料一.

渡邊偉夫(1985), 日本被害津波総覧. 東京大学出版会.

渡邊偉夫(2000), 869(貞観 11)年の地震・津波と推定される津波の波源域. 津波工学研究報告, 第 17 号, 27-37.

山田一郎・庄子貞雄(1981), 宮城県に分布する新期の灰白色火山灰について. 日本土壤肥料学雑誌, 第 52 巻, 第 2 号, 155-158.

## 第4章

### 付録:本研究による成果報告

1. 津波の堆積学: Tsunamis and tsunami sedimentology. Sugawara et al., 2008.
2. 津波石の起源に関する堆積学的研究. 篠崎, 2007.
3. 海底地滑りによる津波の発生—トルコ・北アナトリア断層における地質学的痕跡: A tsunami generated by a possible submarine slide: Evidence for slope failure triggered by the North Anatolian fault movement. Minoura et al., 2005.
4. 引き波に伴う海底堆積物の移動—2004 年インド洋大津波に関する古生物学的検討: Foraminiferal evidence of submarine sediment transport and deposition by backwash during the 2004 Indian Ocean tsunami. Sugawara et al., 投稿中.

本報告書収録の学術雑誌等発表論文は本ファイルに登録しておりません。なお、このうち東北大学在籍の研究者の論文で、かつ、出版社等から著作権の許諾が得られた論文は、個別に **TOUR** に登録しております。